

文章编号: 2095-4980(2020)05-0757-05

用于末端识别的 D 波段主动近感探测器

刘 杰^{a,b}, 安健飞^{*a,b}, 成彬彬^{a,b}, 周 人^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 随着工作频率和带宽的提高, 无线电近感探测器的测距精确度、目标识别能力和抗干扰能力相应提高, 因此开展了 D 波段主动近感探测器的研究。基于 120 GHz 收发芯片 TRA_120_001, 对 D 波段近感探测器进行方案设计。为提高探测距离, 设计了半球型透镜天线并制作了样品。搭建了角反射器为目标的旋转扫描下落实验场景。实验中, 近感探测器在设定目标方向给出了触发信号, 实现了近感探测功能, 并验证了测高触发的能力。

关键词: 调频连续波; D 波段; 主动近感探测; 末敏弹

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019446

D-band detector for active terminal-sensitive projectile

LIU Jie^{a,b}, AN Jianfei^{*a,b}, CHENG Binbin^{a,b}, ZHOU Ren^{a,b}

(a.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;

b.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: With the improvement of frequency and bandwidth of fuse, the accuracy, target identification ability and anti-interference ability of detector are correspondingly improved. Therefore, the research on D-band detector for active terminal-sensitive projectile is carried out. Based on 120 GHz transceiver chip TRA_120_001, a D-band detector is designed. In order to improve the detection distance, a semi-spherical lens antenna is fabricated. The experimental scene of rotating scan falling with angular reflector as the target is built. In the experiment, the detector sets the target direction, gives the trigger signal, realizes the detection function and verifies the ability of range measurement.

Keywords: frequency modulated continuous wave; D-band; active fuze; terminal-sensitive projectile

近感探测器可作为末端识别弹药的敏感器, 其性能指标直接影响作战效果, 实际应用中对近感探测器尺寸、质量和成本有很高的要求^[1]。为满足这些要求, 国内外研究机构开展了波长为 8 mm, 3 mm 的毫米波近感探测器研究^[2]。为对抗末端识别弹药, 提高坦克装甲车辆的生存能力, 防御武器系统已开发出来, 目前防御的方式有烟幕干扰、毫米波箔条箔片、隐身技术、假目标和毫米波干扰器等^[3]。因此, 为提高末端识别弹药作战效果, 需要研究性能更好的近感探测器。相对于传统的毫米波近感探测器, 太赫兹近感探测器具有带宽大、分辨力高、多普勒敏感、抗干扰等独特优势^[4], 因此测角和测距精确度更高, 且支持目标及其部位识别, 区别箔条箔片能力更强; 太赫兹波大气衰减严重, 抗干扰能力更强; 对沙尘烟雾有穿透性, 避免了烟幕干扰。近年来, 太赫兹片上雷达芯片发展迅速, 研制低成本、小型化的太赫兹近感探测器成为可能。本文基于商用 120 GHz 片上雷达芯片 TRA_120_001, 开展了 D 波段近感探测器方案设计, 半球型透镜天线提高了样品探测距离。为验证所研制样品的适用性, 开展了角反射器为目标的旋转扫描下落实验。实验中, 在设定高度和目标方向后, 近感探测器给出了触发信号, 实现了近感探测功能, 同时验证了测高触发的能力。

1 系统组成和工作原理

末端识别弹药由高空抛射待下降到一定高度后进入稳态扫描运动状态; 近感探测器通过匀速的降落和低速

收稿日期: 2019-11-06; 修回日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(61805217)

作者简介: 刘 杰(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹成像系统和有源电路设计。email:liujie2003_2006@163.com

*通信作者: 安健飞 email:anjianfei@mrc.ac.cn

匀速旋转，扫描探测地面高价值目标，在下落到设定高度探测到目标方向并发出触发指令。研制体积小，质量小，抗高过载以及具备电子对抗能力的传感器是末端识别弹药未来的发展趋势^[2,5]。提高频率有助于提高测角和测距精确度，提高识别目标及其部位能力以及电磁对抗能力。本文研究的近感探测器，参考了传统毫米波近感探测器的设计^[16-7]，并将频率提到 D 波段，采用主动调频连续波工作体制，利用回波信号与发送信号的差频信号进行距离和目标检测。

1.1 系统组成

近感探测器组成如图 1 所示，零差式接收前端使天线接收到的回波信号经放大、混频后直接输出差拍信号。相对外差式接收机，体积较小，成本较低。由锁相环发射一定斜率的三角波调频信号，探测到目标后，目标反射信号被接收系统接收，并与当前发射的信号混频、去斜后产生的 IQ 差频信号被中频预处理电路进行滤波、放大后，送给数字处理单元解析出距离信息，通过匹配预设信息判断是否给出触发信号。

商业收发芯片 TRA_120_001 工作在 D 波段，集成了天线、IQ 零中频接收机、压控振荡器等，如图 2 所示，适合近感探测器小型化设计。

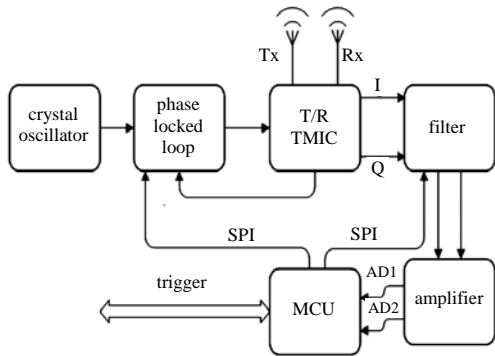


Fig.1 Block diagram of proximity detector
图 1 近感探测器功能框图

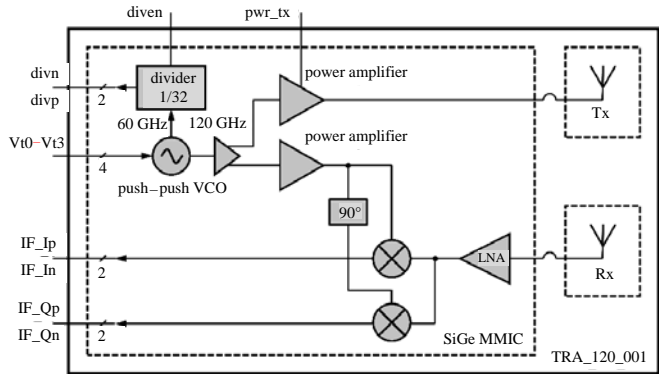


Fig.2 Schematic diagram of TRA_120_001
图 2 TRA_120_001 芯片原理图

1.2 探测距离与测高计算

根据雷达方程，考虑大气衰减的影响，探测器最大作用距离为：

$$R = \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 kTB_n F_N L_d L_s (R_{SN})_{o,min}} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{1}$$

式中： P_t 为发射机输出功率； G_t 和 G_r 为天线发射增益和接收增益； λ 为工作波长； σ 为雷达散射面积； k 为玻兹曼常量； T 为开尔文温度； B_n 为雷达中频带宽； F_N 为接收机噪声系数； L_d 为大气衰减； L_s 为各种连接损耗及未知损耗； $(R_{SN})_{o,min}$ 为最小可检测信噪比。

假设大地回波主要过程是反射，不考虑地面的散射。根据测高方程，考虑大气衰减的影响，探测器最大测高距离为：

$$H = \frac{1}{2} \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 kTB_n F_N L_d L_s (R_{SN})_{o,min}} \right]^{\frac{1}{2}} XK \tag{2}$$

式中： K 为光滑地面的反射系数； X 为实际地面的反射功率与光滑地面反射功率之比。由于试验场地为水泥和草地混合，因此假设 KX 的乘积为1。

1.3 目标检测算法设计

近感探测器能够从回波信号中自动判决和记录有无目标的存在。通常是通过设置一个与虚警概率和杂波背景特性等有关的门限来实现，当检测距离单元超过这个门限时就判为目标。由于目标回波中存在各种随机变化的干扰杂波，一般采用恒虚警率技术以保证目标检测的恒虚警概率。本文采用了基于删除单元的恒虚警检测器算法。检测器的结构如图 3 所示。

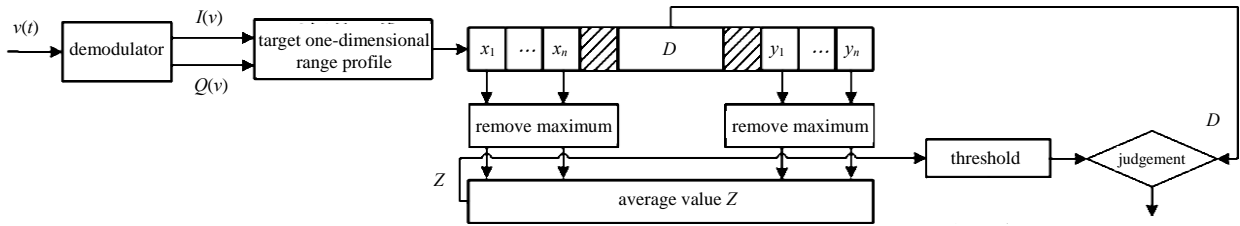


Fig.3 Structure of constant false alarm detector
图 3 基于删除单元的恒虚警检测器的结构

检测器的工作原理：首先要确定或假定背景杂波的类型，然后确定参考单元滑窗的长度。对检测单元附近的参考单元的数据通过某种算法对杂波背景进行估计，再对杂波背景进行归一化，形成一个与杂波参数无关的变量，将这个变量与一个门限进行比较来判断是否存在目标。因这个门限是根据给定的虚警概率和参考单元滑窗长度按某种关系所确定的，加上归一化后的变量值与杂波参数无关，所以能够起到恒虚警检测的作用。

2 近感探测器设计

参考文献[8]中应用场景参数为近感探测器的下降速度为 10 m/s，旋转速度为 4 r/s，天线波束中轴与铅垂线的夹角 30°，主动测距精确度优于 5 m，最大作用距离 150 m，目标尺寸为 3 m × 7 m。从 TRA_120_001 芯片手册可以得到该芯片的部分指标如表 1 所示：

表 1 TRA_120_001 部分指标
Table 1 Datasheet of TRA_120_001

frequency/GHz	Rx antenna gain/dBi	Tx antenna gain/dBi	noise figure/dB	output power/mW
119.3-125.8	≥8.5	≥8	8.7	0.5

通过式(1)对 TRA_120_001 芯片的探测距离进行计算。参数为： $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K, $G_t=G_r=8.5$ dBi, $B_n=0.5$ MHz, $T=300$ K, $F_N=8.7$ dB, $L_d=0.6$ dB, $L_s=1$ dB, $R_{SN}=13$ dB, $\sigma=21$ m², $\lambda=(3 \times 10^8)/(122 \times 10^9)$ m。因此当 TRA_120_001 芯片输出功率为 0.5 mW 时，最大作用距离大约为 4.6 m，无法满足文献[9]中应用场景最大作用距离要求。

通过式(1)和式(2)可以分析输出功率为 0.5 mW 时，最大作用距离和天线增益的关系。图 4 为探测距离与天线增益的关系曲线图，图 5 为测量高度与天线增益的关系曲线图。

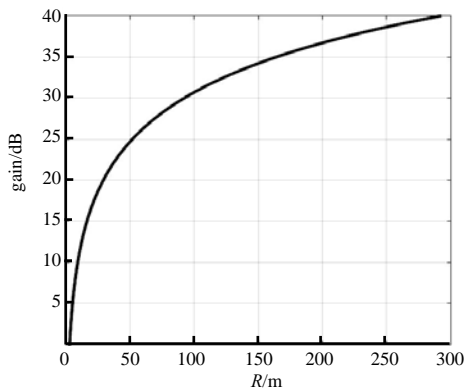


Fig.4 Distance vs. gain
图 4 探测距离与天线增益的关系曲线图

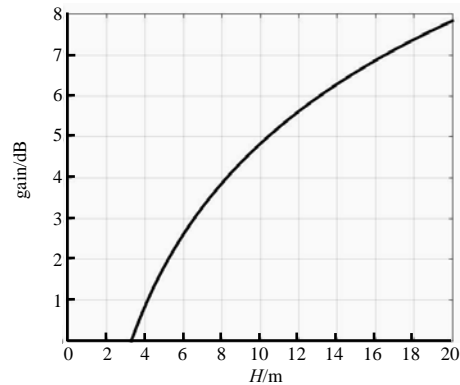


Fig.5 Height vs. gain
图 5 测量高度与天线增益的关系曲线图

从图 4 可以看出，探测距离为 150 m 时，天线增益需要 34.2 dBi。考虑到如果没有探测目标时，在距离地面 3 m 内具备测高触发能力，因此得到天线方向图要求：0°时增益 ≥ 34.2 dBi，30°天线增益 ≥ 0 dBi。

为达到所需的探测能力，设计了半球型透镜天线用于提高收发天线增益，如图 6 所示。半球型透镜天线直径 100 mm，收发芯片距离天线 56 mm，由聚四氟乙烯制作。图 7 方向图仿真结果表明：半球型透镜的方向图在 0°时增益 ≥ 35 dBi，30°天线增益 ≥ 5 dBi。

为模拟应用场景，搭建的实验场景如图 8 所示。在高塔上释放配重后的近感探测器样品，使其在重力加速度与减速伞的共同作用下达到匀速旋转扫描下落，当近感探测器下落到设定目标方向时，近感探测器作用并产生可观测的光信号，通过高速摄影记录该时刻样品的离地高度，该高度即为探测器实际作用高度；同时高速摄

影记录该时刻样品状态，可以大致判断样品的指向。

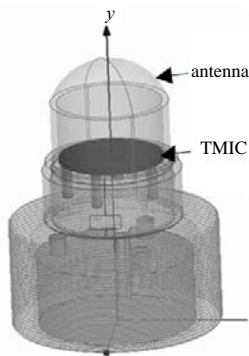


Fig.6 Schematic diagram of proximity detector
图 6 近感探测器示意图

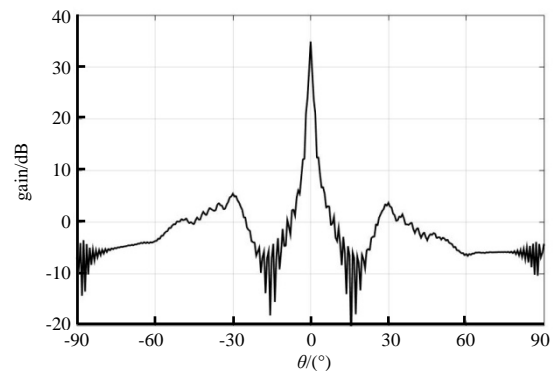


Fig.7 Antenna pattern
图 7 天线方向图

3 实验结果

由于高塔实验台的高度以及摄像机角度的限制，将角反射器距离设置为 6 m，目标的反射截面等效缩小为 4.18 cm²，在高塔实验台顶处释放实验样品，使其在重力加速度与旋转伞的共同作用下实现对地面模拟目标(角反射物)的稳态扫描，当探测器发现目标时，近感探测器作用并使 LED 灯带产生可观测的光信号，通过高速摄像记录并判别近感探测器作用高度。

对高速摄像图像处理得到实验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，实验中近感探测器的落速和转速接近文献[9]的场景参数。实验 3 和实验 4 给出了触发信号，指示了目标方向，实现了近感探测功能。触发高度不一样是由于旋转和落速不一样导致的。实验 5 中没有放置反射器，用于测试近感探测器测高触发的能力，预设高度为 2.5 m，测试的触发距离为 2.35 m，结果表明近感探测器具备测高触发的能力。

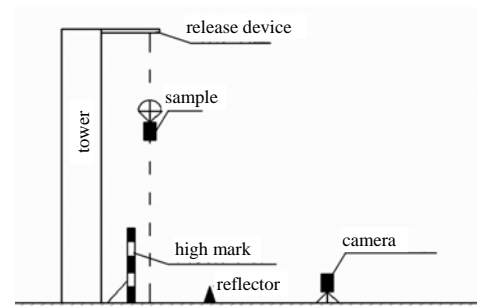


Fig.8 Schematic of experimental scene
图 8 实验场景原理图

表 2 高塔旋转扫描实验结果

Table 1 Results of high tower rotating scan experiment

SN	rotating speed /(r·s ⁻¹)	falling speed /(m·s ⁻¹)	RCS/cm ²	scan angle	reflector distance/m	trigger height/m	direction
experiment 1	3	11.55	4.18	30°	none	drop test	none
experiment 2	3	14.27	4.18	30°	none	drop test	none
experiment 3	3.5	18.09	4.18	30°	6	10.22	correct
experiment 4	3.5	14.04	4.18	30°	6	7.23	correct
experiment 5	none	23.75	none	30°	none	2.35	none

4 结论

随着目标防御能力的提高，对无线电近感探测器的测距精确度、目标识别能力和抗干扰能力提出新的需求，提高无线电近感探测器的工作频率和带宽是满足该需求的途径之一。本文因此开展了 D 波段主动近感探测器的研究，首先基于 120 GHz 收发芯片 TRA_120_001，开展了 D 波段近感探测器方案设计，分析了探测距离和测高距离；然后设计了半球型透镜天线提高了探测距离以满足场景需求，并制作了样品；最后开展了旋转扫描下落实验。实验结果验证了 D 波段主动近感探测器的功能和能力。

参考文献：

- [1] 刘水英,李鹏,范昕,等. 末敏弹调频毫米波雷达引信[J]. 制导与引信, 2011,32(4):8-11. (LIU Shuiying,LI Peng,FAN Xin, et al. The frequency modulation millimeter-wave radar fuze applied to terminal-sensitive projectile[J]. Guidance and Fuze, 2011,32(4):8-11.)

(下转第 765 页)